

6
А-52

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
СОВЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ГОРНОМУ ДЕЛУ ОБЪЕДИНЕННОГО
СОВЕТА ПО ТЕХНИЧЕСКИМ И ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ

На правах рукописи

КАРАГУЛОВ НУРДИН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ
В ГОРНЫХ СКЛОНАХ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

Специальность 01.02.07. Механика грунтов, горных пород и
сыпучих материалов

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Фрунзе 1973

АКАДЕМИЯ НАУК КИРГИЗСКОЙ ССР
СОВЕТ ПО ГЕОЛОГИИ И ГОРНОМУ ДЕЛУ ОБЪЕДИНЕННОГО
СОВЕТА ПО ТЕХНИЧЕСКИМ И ЕСТЕСТВЕННЫМ НАУКАМ

на правах рукописи

КАРАГУЛОВ НУРДИН

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ
В ГОРНЫХ СКЛОНАХ МЕТОДОМ ФОТОУПРУГОСТИ

Специальность 01.02.07. Механика грунтов,
горных пород и сыпучих материалов

Автореферат
диссертации на соискание ученой
степени кандидата технических наук

Фрунзе - 1973

Горные районы Средней Азии, Кавказа, Закавказья и других областей все интенсивнее вовлекаются в народнохозяйственное освоение. Из горных рек сооружаются крупные гидротехнические и гидроэнергетические комплексы, имеющие не только местное, но и межреспубликанское значение. Таковы Нурекская и Токтогульская ГЭС, Чиркейская и Ингури ГЭС, Чарвакское, Андиканское и Кировское водохранилища (Средняя Азия).

Весьма значительны перспективы дальнейшего развития гидротехнического строительства в этих районах. Например, только на р. Нарин в Киргизии намечено строительство 22 гидроэлектростанций.

Широкая сеть автомобильных дорог и дорожных сооружений прокладывается в сложных горных условиях к местам разработки месторождений полезных ископаемых и крупным животноводческим районам. Разработка месторождений открытым способом в последнее время становится все более преобладающей при добыче полезных ископаемых. Все перечисленные случаи содержат общую и весьма важную задачу — правильно оценить устойчивость горных склонов и бортов карьеров.

До недавнего времени считали, что скальные склоны являются прочными и надежными основаниями для различного рода сооружений и строительство на таких породах не вызывает особых осложнений. В связи с этим изучению устойчивости горных склонов и оснований долин, сложенных прочными породами, уделялось недостаточное внимание. Однако, практика строительства в этих районах доказала ошибочность такого предположения.

Грандиозные оползни и обвалы, отмеченные в последние годы в некоторых районах мира и приведшие в ряде случаев к крупным трагическим последствиям, чрезвычайно повысили ответственность ученых и инженеров в вопросах оценки устойчивости горных склонов в местах строительства крупных инженерных сооружений и поставили под сомнение известные методы решения таких задач.

Известно, что одним из главных факторов, определяющих устойчивое состояние массивов горных склонов, является их напряженное состояние. Исследованиями распределения напряжений в горных склонах стали уделять должное внимание только в последнее время. Результаты немногочисленных работ, посвященных этому направлению, являются лишь первым шагом в познании природы напряжений в массиве пород склона.

Настоящая работа посвящена исследованию влияния геометрических параметров и некоторых геологических факторов на напряженное состояние горных склонов в условиях действия гравитационных сил.

Результаты работы нашли практическое применение при сооружении Токтогульского гидроузла.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 105 наименований и содержит 124 страницы машинописного текста, 63 рисунка, 6 таблиц, 1 приложение.

В главе I содержится обзор работ, посвященных исследованию распределения напряжений в горных склонах и откосах карьеров, выполненных различными методами.

Краткий анализ этих исследований (Ахпателов Д.М., Будков В.П., Бхатачария К.К., Золотарев Л.С., Ильин А.И., Калинин Э.В., Каменнова Ю.А., Кутепов В.М., Мгалобелов Ю.Б., Морозов В.Д., Никитин С.Н., Новожилов С.Н., Сарафим Л., Стеки Р., Степанов В.Я., Федоров И.В. и др.) позволяет сделать следующие выводы:

1. Натурные методы измерения напряжений в массиве горных пород при их современном состоянии применимы для определения напряжений лишь в отдельных точках склона. Поэтому по данным натурных измерений практически невозможно получить распределение напряжений по всему склону, а также в основании речных долин.

2. Работы, посвященные исследованию напряженного состояния склонов в моделях, немногочисленны и посвящены в основном решению частных задач; распределение напряжений в них дано для отдельных небольших областей склонов речных долин, что лишь качественно отражает их напряженное состояние. Результаты исследований напряженного состояния откосов карьеров на моделях, полученные различными авторами, разноречивы.

3. В исследовании напряженного состояния горных склонов и откосов карьеров аналитические методы начали применяться лишь в последнее время. По данным немногочисленных исследований, выполненных аналитическими методами, пока не представляется возможным сделать достаточно полные выводы о напряженном состоянии склонов.

Расчетные методы, предназначенные для определения общего коэффициента устойчивости откосов карьеров и склонов, не позволяют раскрыть поле распределения напряжений в массиве пород.

4. При исследовании напряженного состояния склонов различными методами остается неучтенным фактор неоднородности и тре-

щиноватости массива пород, слагающего склоны. Единичными исследованиями, посвященными изучению влияния трещин на напряженное состояние склонов и выполненными методами моделирования, получено лишь частичное решение поставленной задачи.

Из этих выводов стала очевидной необходимость проведения систематизированного исследования задачи о напряженном состоянии склонов в зависимости от различных факторов, влияющих на распределение напряжений в породном массиве. Из имеющихся большого числа разнообразных факторов некоторые играют наиболее существенную роль в формировании картины напряжений в склонах. К этим факторам в первую очередь следует отнести их геометрические параметры и геологическое строение.

Наиболее полную информацию о величинах и характере распределения напряжений в склонах можно получить при помощи экспериментальных методов исследования напряженного состояния, достоверность которых доказана на практике. Из существующих экспериментальных методов наиболее приемлемым для изучения напряженного состояния склонов является метод фотоупругости. Метод фотоупругости в горном деле применяется главным образом для решения задач о распределении напряжений вокруг горных выработок различного назначения. В работах Трумбачева В.Ф., Борисенко С.Г., Мельникова Е.А., Несторенко Г.Г., Оберта Л. и др. показано, что величины напряжений вокруг горных выработок, определенных методом фотоупругости на моделях, имеют хорошую сходимость с результатами натурных и аналитических исследований. Это свидетельствует о правомочности его применения для исследования распределения напряжений в массиве горных пород, слагающих склоны.

В представленной работе исследование распределения напряжений в горных склонах и в основаниях долин выполнено методом фотоупругости на плоских моделях.

Целью настоящей работы является установление влияния геометрических параметров и некоторых геологических факторов на напряженное состояние горных склонов в условиях действия гравитационных сил. В соответствии с этой целью были определены следующие задачи исследования:

1. Усовершенствовать приемы метода фотоупругости применительно к исследованию напряжений и разрушений в склонах.

2. Исследовать напряженное состояние горных склонов и основа-

ний длины и установить закономерности распределения напряжений в склонах, имеющих различные геометрические параметры.

3. Установить влияния отдельных условий неоднородности и трещиноватости массива пород на напряженное состояние склона.

4. Исследовать распределение напряжений в склоне с конкретными горно-геологическими условиями и показать правомерность использования метода фотоупругости в числе комплексных методов при изучении напряжений в склонах с учетом неоднородности и трещиноватости пород.

В главе II кратко изложены основные положения метода фотоупругости и описана методика проведения исследований. В качестве оптически активных материалов для изготовления моделей были использованы ирдантин, эпоксимал и частично агарин. Для обеспечения условия равенства коэффициентов бокового распора модели, изготовленной из низкомодульного оптически активного материала, и массива пород природы использовалась схема получения приведенного коэффициента бокового распора (Морозов В.Д.).

В работе показано, что применение этой схемы оправдывается при изучении напряжений в моделях, имеющих определенную заданную величину коэффициента бокового распора. При изучении напряженного состояния моделей в зависимости от коэффициента бокового распора в значительном диапазоне его значений эксперименты проводились на моделях из высокомодульного оптически активного материала, что позволяло широко варьировать величинами боковых горизонтальных нагрузок. Модели из высокомодульных материалов гравитационной нагрузкой были нагружены на центрифугах Московского инженерно-строительного института и Института горного дела СО АН СССР, имеющих диаметры 280 см и 240 см соответственно.

На оптически активных моделях, имеющих трещины, трудно воспроизвести однозначное напряженное состояние при повторных нагружениях. Многозначность напряженного состояния моделей из низкомодульных материалов с трещинами обусловлена различной степенью прилипания и кон активирования стенок трещин. Исследованиями установлено, что при создании в трещинах постоянных условий устанавливается достаточно хорошая повторяемость распределения напряжений в моделях от опыта к опыту.

В работе показано, что для определения величин разности хода параметров изоклин в моделях склона необходимо применение поля-

риметра типа КСП и полярископа, имеющего большое рабочее поле.

Это позволяет наиболее полно оценить распределение напряжений по всему полю модели склона. Для этой цели был использован переоборудованный немецкий оптический прибор для измерения напряжений с диффузионным источником света. Хотя поляриды данной установки имеют диаметр 300 мм, размеры её рабочего поля практически не ограничены. Это достигается путем увеличения расстояния между поляризатором и анализатором, а также применением длиннофокусной оптики. Ширина теневой полосы, получаемая на краях модели из-за влияния непараллельности просвечивающих лучей, при оптимальных расстояниях между поляроидами, а также между моделью и длиннофокусной регистрирующей аппаратурой, сводится к минимуму.

Практически все картины изохром моделей, представленные в работе, получены с помощью этой установки.

Известно, что с помощью моделей из оптически активного материала агарина можно изучить не только распределение напряжений, но и в определенной степени выяснить характер разрушения горных пород. Однако, модели из агарина разрушаются при достаточно больших нагрузках, что требует для некоторых задач замены весомой полуплоскости невесомой; при этом гравитационные силы приводятся к контурной нагрузке. При решении задач устойчивости горных склонов и откосов карьеров, когда недопустима замена гравитационной силы контурной нагрузкой, изучение характера разрушения моделей с одновременным наблюдением их напряженного состояния становится весьма сложной технической задачей.

Для таких случаев в работе предлагается новый способ нагружения моделей из оптически активных материалов гравитационной нагрузкой.

В качестве установки, способной создавать гравитационную нагрузку, был использован линейный механический ускоритель. Испытуемая плоская модель из оптически активного материала в вертикальном положении помещается в специальный контейнер, который затем сбрасывается с определенной высоты с последующим плавным торможением на небольшом участке, определяемым рабочим полем оптической установки и параметрами линейного механического ускорителя. При торможении модель воспринимает определенную нагрузку, которая приводит к появлению в ней картины изохром, а при подборе величины

нагрузки (путем изменения режима работы линейного механического ускорителя) — и к разрушению в модели. Поле ускорения на ускорителе возрастает плавно и так же плавно исчезает, не давая динамических эффектов.

Картина изохр и разрушения в моделях регистрировалась в поляризованном свете скоростной кино съемочной камерой СКС-ИМ-16. В качестве полярископа была использована поляризационная установка с большим рабочим полем, позволяющая исследовать модели при их движении на заданном участке.

В работе также предложены приемы моделирования трещин и изготовления слоистых оптически активных моделей; использованы различные нагрузочные приспособления и термостаты для "замораживания" образцов, сконструированные и изготовленные автором.

В главе III описаны результаты изучения напряженного состояния горных склонов и оснований долины в зависимости от их геометрических параметров.

Вначале изучались напряжения в склонах симметричной долины, имеющих средний угол наклона $\alpha = 70^\circ$ и радиус закругления основания долины $R = 0,042 H$ (где H — высота склонов). Результаты исследований представлены в виде изолиний максимальных касательных, горизонтальных, вертикальных и наибольших главных напряжений.

На рис. I представлен пример распределения максимальных касательных напряжений в склоне и в основании долины. Значения напряжений в моделях даны в порядках полос. По известным величинам объемного веса материала, цены полос и толщины модели можно легко перейти от порядков полос к напряжениям в натуре:

$$\sigma_n = \frac{\gamma_n}{\gamma_m} M \frac{n \cdot \sigma_0^{(1,0)}}{2d} \quad (I)$$

где σ_n — напряжения в натуре;

γ_n, γ_m — объемные веса горной породы и материала модели;

M — масштаб моделирования;

n — порядок полосы;

$\sigma_0^{(1,0)}$ — цена полосы материала;

d — толщина модели.

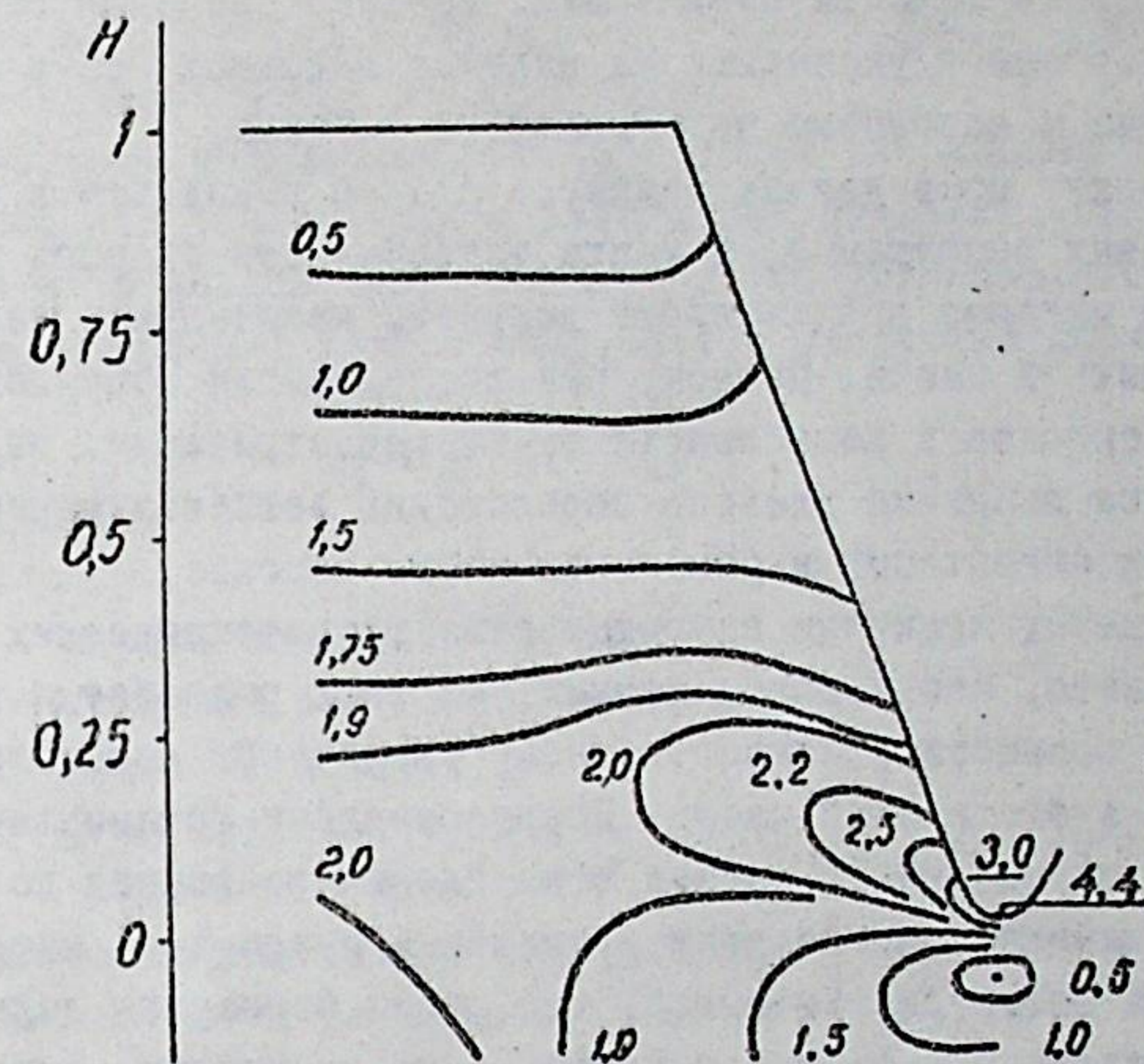


Рис. I. Изолинии максимальных касательных напряжений τ_{max} в склоне.

Результаты исследований показали, что в склоне и основании долины при данных геометрических параметрах отсутствуют растягивающие напряжения, если не считать небольших по величине растягивающих горизонтальных напряжений, имеющих место в верхней части склона.

Высокая концентрация напряжений наблюдается главным образом в породах нижней части склона и дне долины. Этот результат, полученный методом фотоупругости на моделях, хорошо согласуется с данными практики строительства гидротехнических сооружений в глубоких долинах и разработки полезных ископаемых открытым способом. Для подтверждения этого приведены примеры. Показано, что высокая напряженность нижней части склона и дна долины в определенных условиях приводит к трещинообразованию и "стреляниям" пород в зоне концентрации напряжений.

Для установления степени связности пород дна с основным

подстилающим массивом рекомендуется определить в этих породах значения горизонтальных напряжений. Высокие значения горизонтальных напряжений указывают на наличие надежной связи между породами дна и основного подстилающего массива.

Из анализ приведенных примеров сделан вывод, что в отношении локальных разрушений, а также устойчивости склонов в целом наибольший интерес представляют величины касательных напряжений в их нижней части. Поэтому при исследовании напряженного состояния склонов в зависимости от их геометрических параметров основное внимание уделено определению величины максимальных касательных напряжений в указанном месте массива.

На примерах практики строительства гидротехнических сооружений показано, что в определенных условиях разработка котлована может привести к искусственному увеличению концентрации напряжений в его нижней части. Исследованиями установлено, что существует определенный радиус закругления основания долины, при котором величина концентрации напряжений принимает наименьшее значение. Из этого сделан вывод, что форма основания долины играет существенную роль в формировании концентрации напряжений в нижней части склона. Во избежание искусственного увеличения концентрации напряжений горные работы в нижней части склона рекомендуется производить с учетом необходимости придания дну долины оптимального закругления.

Результаты исследований распределения напряжений в склонах, имеющих различные углы наклона, показали, что их напряженное состояние подчинено определенным общим закономерностям:

1. Во всех склонах концентрация напряжений приурочена к их нижней части.
2. С увеличением угла наклона увеличивается интенсивность изменения напряжений в склоне.
3. При исследованных значениях угла наклона от 0 до 80° в склонах и в основании долины отсутствуют растягивающие напряжения (если не считать небольших по величине растягивающих напряжений, отмеченных в верхней части склона при $\alpha = 70^\circ$ и его в верхней и прибортовой частях при $\alpha = 80^\circ$).

Исследованиями распределения напряжений в склоне в зависимости от его высоты и ширины основания долины установлено, что данные геометрические параметры оказывают влияние в основном на

напряженное состояние нижней части склона и основания долины. При этом в характере распределения напряжений в самом склоне изменения практически не происходит.

Обработка полученных данных методом наименьших квадратов показала, что зависимость величины максимальных касательных напряжений в нижней части склона от его угла наклона, высоты и ширины основания долины описывается следующей формулой:

$$\tau_{\max} = 2,74 e^{-5,19 \cdot 10^{-5} b} \cdot \gamma H \frac{\pi}{\alpha} \quad (2)$$

где b — ширина основания долины, см;

γ — объемный вес горной породы, г/см³;

H — высота склона, см;

α — угол наклона, град.;

π — развернутый угол, 180° , град.;

С помощью предложенной формулы можно легко вычислить значения максимальных касательных напряжений в нижней части склона при известных его геометрических параметрах, а также физических постоянных горной породы.

Результаты исследования напряжений в склонах ассиметричной долины показали, что с уменьшением высоты и угла наклона одного из склонов пропорционально уменьшается и величина концентрации напряжений в его нижней части, а концентрация напряжений во втором склоне остается постоянной. При этом напряженное состояние основания долины существенно меняется. Сравнение полей изолиний напряжений и их траекторий в склоне ассиметричной долины, когда высота и угол наклона одного из склонов равны нулю (напряженное состояние в данном случае соответствует напряженному состоянию откосов карьеров) с соответствующими полями склона симметричной долины показывает, что отличие в величинах и характере распределения напряжений наблюдаются, главным образом, в основании долины; распределение напряжений в остальной части склонов практически совпадают.

По данным напряженного состояния склонов, полученным методом фотоупругости на моделях, в работе произведена оценка их прочности. Для определения степени прочности горных пород был принят коэффициент запаса, представляющий собой отношение главного наибольшего напряжения, соответствующего предельному со-

стоянию, к действующему главному напряжению. С достаточной для практики степенью точности предельное состояние через главные напряжения может быть представлено в виду формулы Кулона:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \cos \varphi = \left(\frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} - \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} \sin \varphi \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi + c \quad (3)$$

или

$$\sigma_1 = \sigma_2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta + 2c \cdot \operatorname{ctg} \theta \quad (4)$$

где $\theta = 45^\circ - \frac{\varphi}{2}$

φ, c — угол внутреннего трения и величина сцепления горной породы.

Практически расчет производили следующим образом. По известному значению действующего напряжения σ_2^0 в рассматриваемой точке склона по формуле (4) определялась величина σ_1^{np} (что имело место в предельном состоянии). Значение σ_1^{np} делилось на известное для данной точки σ_1^0 , т.е.

$$K = \frac{\sigma_2^0 \cdot \operatorname{ctg}^2 \theta + 2c \cdot \operatorname{ctg} \theta}{\sigma_1^0} \quad (5)$$

Выражение (5) позволяет определить значение коэффициента запаса прочности для любой точки склона при известных значениях главных напряжений и прочностных характеристиках массива. Определив по выражению (5) значения коэффициента запаса прочности для ряда точек можно получить поле изолиний прочности в склоне. Если имеется поле изолиний прочности для некоторого частного случая, то легко можно выделить в склоне область предельного напряженного состояния, где следует ожидать начало разрушения.

В качестве примера на рис. 2 представлено поле изолиний прочности для склона, имеющего угол наклона $\alpha = 70^\circ$, высоту $H = 600$ м и ширину основания долины $b = 50$ м. В расчете были приняты следующие значения прочностных и физических параметров горной породы:

$$\varphi = 52^\circ; \quad c = 14 \text{ кг/см}^2; \quad \gamma = 2,65 \text{ г/см}^3$$

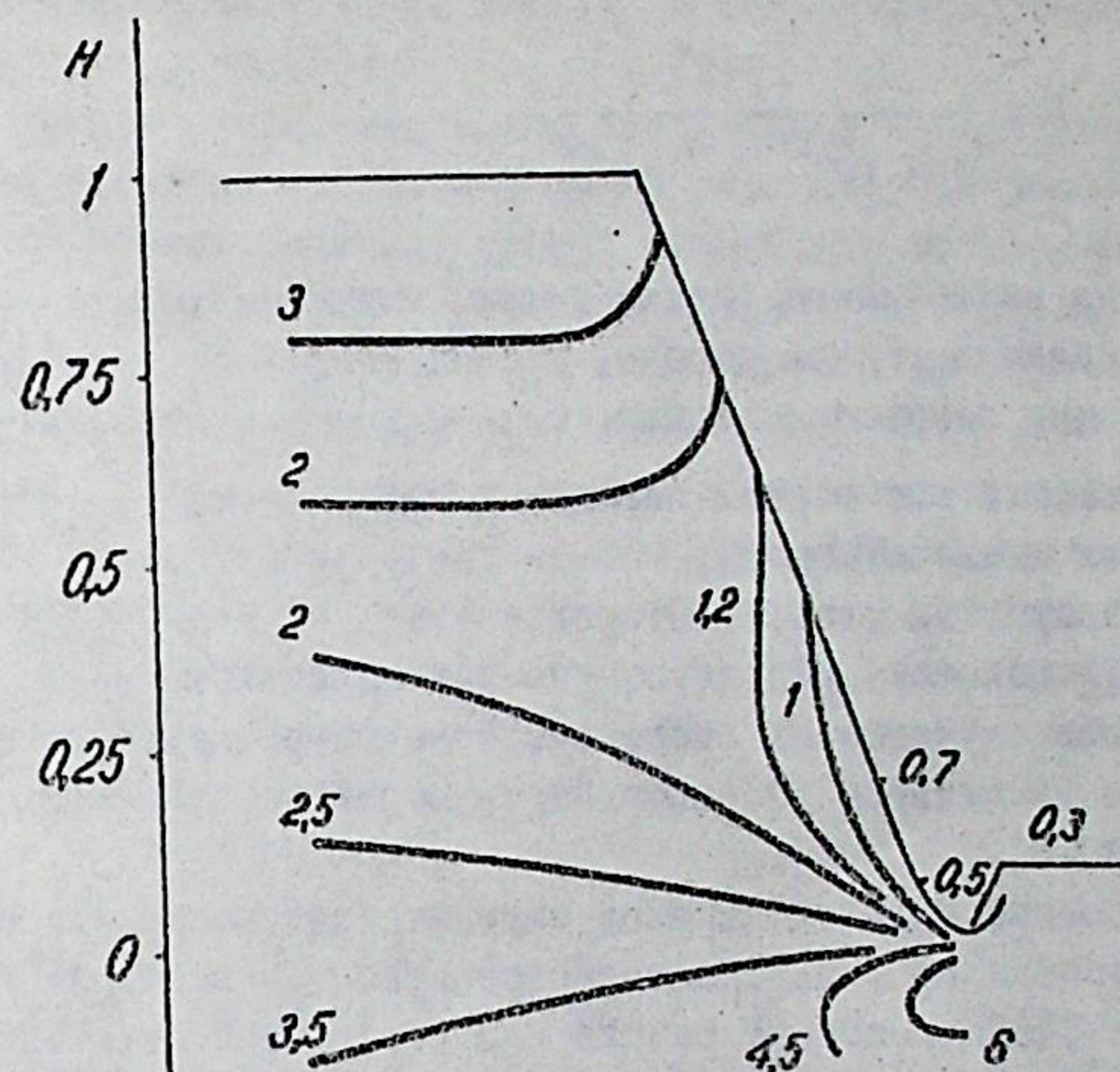


Рис. 2. Изолинии прочности в склоне.

В принципе в области, заключенной между поверхностью склона и изолинией $K = 1$ прочность породы превзойдена. Однако разрушение или даже пластическое течение скальной породы не может одновременно произойти повсеместно, а его начало следует ожидать прежде всего в нижней части склона. Данный вывод хорошо согласуется с результатами натурных наблюдений за состоянием склонов. Для подтверждения в работе приведены примеры.

Изучение полей изолиний прочности в склоне в зависимости от его угла наклона высоты и ширины основания долины показало, что во всех случаях наименьшее значение K наблюдается в нижней части склона. Поэтому в работе приведены результаты исследований изменения величин коэффициента запаса прочности при различных геометрических параметрах склона, лишь для его нижней части.

Для определения предельного состояния пород нижней части

склона в зависимости от его угла наклона, высоты и ширины основания долины в работе предложена формула:

$$K = \frac{c \cdot \sin(45^\circ - \frac{\psi}{2})}{2,74 \cdot e^{-5,19 \cdot 10^{-5} b} \cdot \gamma \cdot \frac{\alpha}{\pi}} \quad (6)$$

где ψ – угол внутреннего трения горной породы, град.;
 c – сцепление горной породы, г/см²;
 b – ширина основания долины, см;
 γ – объемный вес горной породы, г/см³;
 α – угол наклона, град.;
 π – развернутый угол, 180 град.;

В главе IV изложены результаты исследования напряженного состояния склонов с учетом их геологического строения. Исследование проведено на примере долины р. Нарви в районе строительства Токтогульской ГЭС.

При построении моделей склонов были использованы материалы, изложенные в работах ведущих специалистов отдела инженерной геологии института САОГидропроект Чечота В.З., Кагана М.Л., Каякина В.В. и др.

При нагружении образцов известняка, слагающего склоны долины, до нагрузки 60% от разрушающей с последующей разгрузкой до нуля, фиксировались деформации, среди которых преобладали упругие. В большинстве опытов кривые нагрузки и разгрузки практически совпадают. Это позволяет считать породы массива на участке гидроузла упругими в пределах расчетных нагрузок.

При построении моделей неоднородность пород рассматривалась в масштабе геометрии склона, т.к. в определенных его объемах известняки в достаточной мере однородны. Породы зоны разуплотнения, опоясывающие контур долины, по физико-механическим свойствам отличаются от пород основного массива. В качестве критерия отличия зоны разуплотненных пород от пород основного массива был взят модуль упругости известняков.

Сложное геологическое строение массива и наличие в нем значительной серии трещин затрудняет построение модели склона. При этом необходима довольно широкая информация о свойствах и структуре реального массива для схематизации сложных природных условий. Все эти сведения получить с достаточной полнотой практически невозможно.

но. С другой стороны не все детали природы возможно воспроизвести на моделях. В связи с этим при построении моделей были приняты определенные условия и сделаны допущения, но основные свойства массива сохранены.

На первом этапе напряжения изучались в одногодной и изотропной модели склона, а затем в более сложных, отражающих неоднородность и трещиноватость пород. Результаты исследований представлены в виде изолиний максимальных касательных напряжений и эпюр главных, горизонтальных и вертикальных напряжений для отдельных характерных областей склона и основания долины.

В табл. I представлены величины вертикальных напряжений в одном из характерных горизонтальных сечений, полученных методом фотоупругости на моделях и рассчитанные по весу вышележащих пород, а также отношения этих величин. Как видно из таблицы, рассчитывать величины напряжений в склоне по весу вышележащих пород совершенно недопустимо.

Таблица I

Расстояние от дна долины в м	25	50	75	100	150	200	300	400
Напряжение, полученное на моделях σ_m	46,1	67,4	83,2	96,6	113,5	126,7	142,1	153,8
Напряжение, рассчитанное по весу вышележащих пород $\sigma_{гн}$	3,2	15,4	38,4	56,7	72,6	88,0	121,3	152,6
Отношение $\frac{\sigma_m}{\sigma_{гн}}$	14,40	4,38	2,17	1,70	1,56	1,43	1,17	1,01

Исследование распределения напряжений в склоне при различных значениях коэффициента бокового распора показали, что силы бокового распора существенное влияние оказывают в основном на напряженное состояние основания долины и нижней части склона. Рост коэффициента бокового распора приводит к пропорциональному увеличению величины концентрации напряжений в его нижней части. Влияние боковых сил в первую очередь проявляется в изменении размера зоны концентрации напряжений; с увеличением боковых сил расширяется граница этой зоны. В самом склоне влияние боковых

сил наблюдается лишь в его нижней половине и практически не затрагивает остальной верхней части.

Исследованием напряженного состояния моделей склона, имеющего зону разуплотненных пород, установлено, что отличительной особенностью распределения напряжений в таких склонах является образование зоны пониженных напряжений в пределах разуплотненных пород, которая на границе с породами основного массива переходит в зону повышенных напряжений. Так как переход от зоны разуплотненных пород к основному массиву в натуре происходит постепенно, а выделение их четкой границы является условным, то в натуре следует ожидать также постепенный переход зоны пониженных напряжений в зону относительно повышенных. Сравнение полей изолиний напряжений рассматриваемого и однородного склонов показали, что наличие зоны разуплотнения приводит к перераспределению напряжений главным образом в прибортовой и верхней частях склона. При этом напряженное состояние массива, удаленного от приконтурной части, а также основания долины остается таким же, как в однородном склоне.

Определение влияния трещин на напряженное состояние массива горных пород, слагающих склоны, является задачей большой сложности. Изучение данного вопроса в работе было начато с отдельных одиночных трещин, без знания влияния которых осложняется интерпретация результатов изучения сложной их системы. Хотя одиночные трещины в натуре встречаются крайне редко, однако из множества хаотически расположенных трещин иногда удается выделить господствующую их систему и даже одиночные трещины, оказывающие существенное влияние на устойчивость склона.

Исследование распределения напряжений в склоне в зависимости от ориентировки имеющихся в нем одиночных трещин показало, что трещины, расположенные параллельно контуру склона или близко к этому направлению наиболее сильно влияют на напряженное состояние массива. Опасность этих трещин в отношении устойчивости склона объясняется наличием растягивающих напряжений на их концах. Этот вывод был подтвержден на моделях из оптически активного материала агарина, на которых можно изучить характер разрушения горных пород. Гравитационной силой модели были нагружены на линейном механическом ускорителе по предложенной в работе методике.

На рис. 3 представлены изолинии максимальных касательных напряжений в рассматриваемом склоне с учетом имеющихся в нем основных трещин. Значения напряжений даны в кг/см^2 . Влияние трещин на на-

пряженное состояние склона оценивалось путем сравнения данных однородной и имеющих трещины моделей. Установлено, что с появлением трещин приконтурная часть склона разгружается. Изучение величин и характера распределения максимальных касательных, главных наибольших и наименьших, горизонтальных и вертикальных напряжений в отдельных характерных сечениях приконтурной части массива склона показало, что главные наименьшие напряжения в некоторых местах становятся растягивающими.

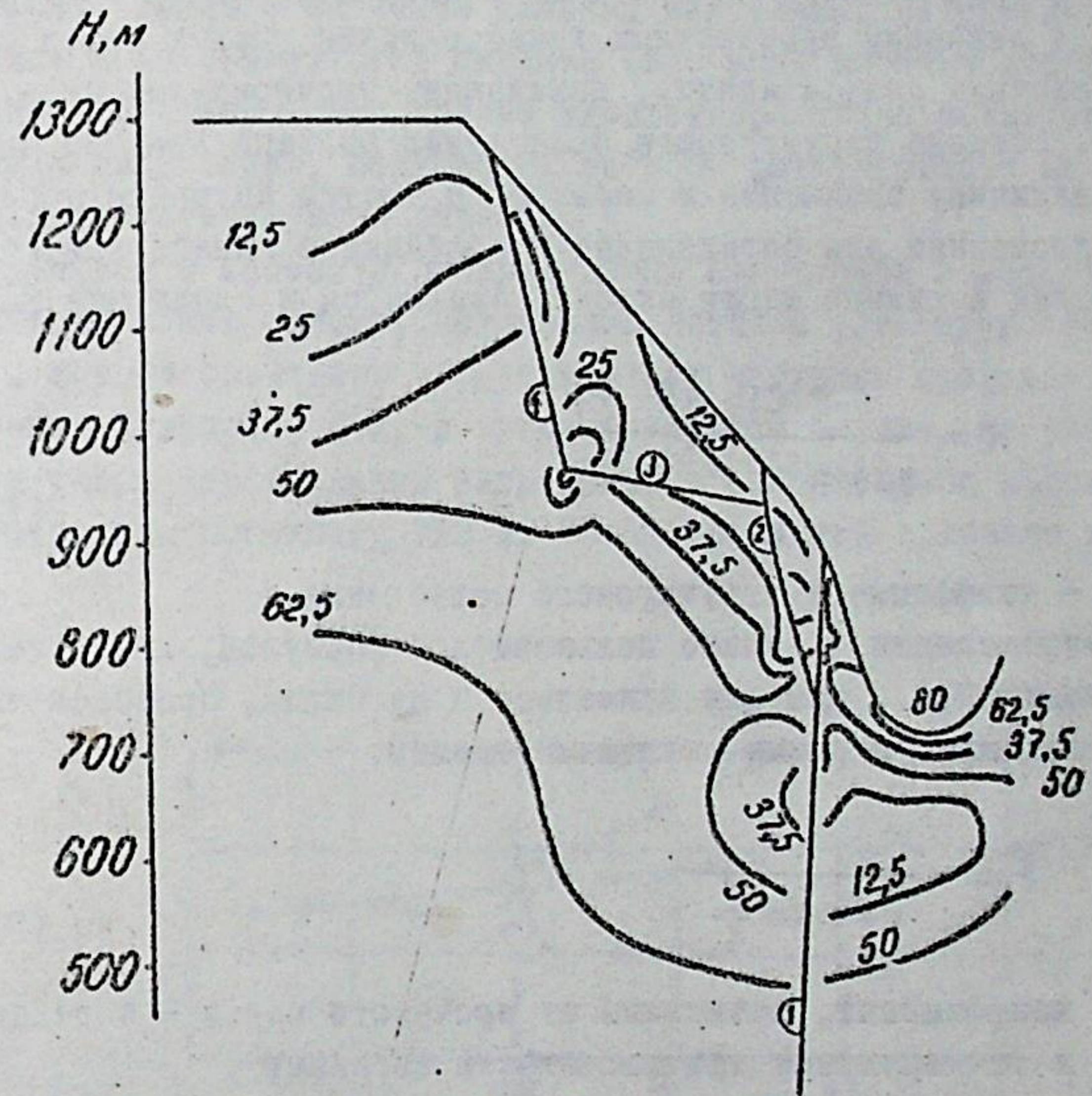
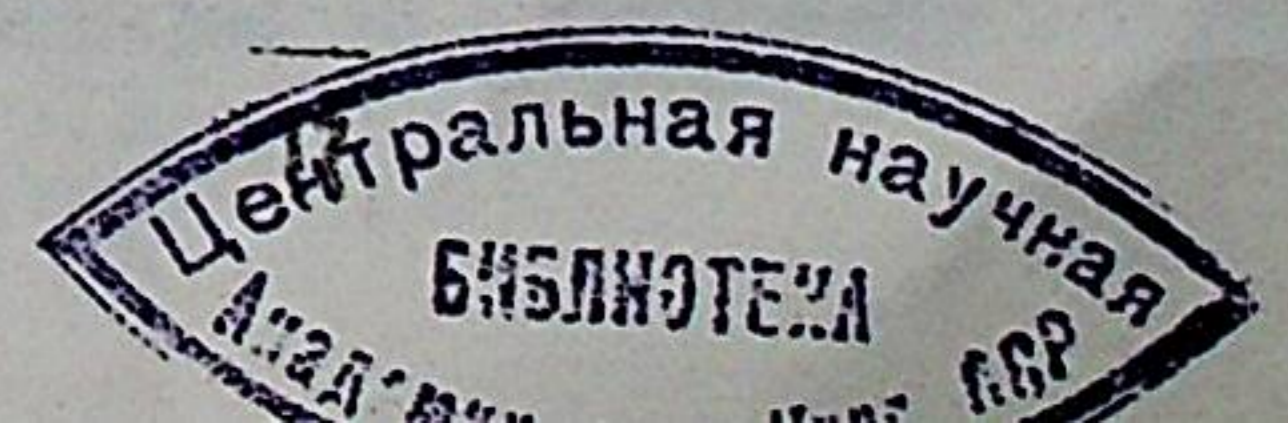


Рис. 3. Изолинии максимальных касательных напряжений в склоне с трещинами (1, 2... - номера трещин)

Величины напряжений, полученные на моделях, представляют собой средние значения существующих в массиве пород склона напряжений, т.к. в натуре следует считать их неравномерного распределения. Как показали результаты исследований, в принципе в факторах, определяющих неравномерное распределение напряжений в массиве по-



род относятся условия в трещинах, неровность их поверхностей, неоднородность пород, блочное строение массива и т.д.

Исследованием влияния блочности породы на напряженное состояние массива, выполненным на моделях, установлено, что в определенных условиях массивы пород с блочным строением можно рассматривать как квазизотропную среду. В последнем случае для расчета напряжений и коэффициента запаса прочности горных пород в нижней части склона вполне допустимо в первом приближении пользоваться формулами (2) и (6). Однако, при этом в расчет необходимо вводить значения прочностных характеристик горных пород с учетом поправочных коэффициентов, понижающих прочность массива. Как известно, степень структурного ослабления большое влияние оказывает на величину сцепления в массиве, с учетом которого формула (6), предложенная для определения коэффициента запаса прочности горных пород в нижней части склона, запишется в следующем виде:

$$K = \frac{\xi \cdot C \cdot \operatorname{ctg} \left(45^\circ - \frac{\psi}{2} \right)}{2,74 \cdot e^{-5,19 \cdot 10^{-5} B} \cdot \frac{\sigma}{\pi}} \quad (7)$$

где ξ — коэффициент структурного ослабления.

Для определения ξ можно пользоваться формулой, предложенной проф. Фисенко Г.Л., которая применима к массивам, ослабленным взаимно перпендикулярными системами трещин:

$$\xi = \frac{1}{1 + a \cdot \ln \frac{l}{l_0}} \quad (8)$$

где a — коэффициент, зависящий от прочности пород в образце и от характера трещиноватости массива;

l — размер массива;

l_0 — размер структурного блока.

С помощью формулы (7) в работе рассчитаны величины коэффициента запаса прочности горных пород в нижней части склона для различных значений сцепления в массиве, угла внутреннего трения, высоты и угла наклона склона, а также ширины основания долины. Расчеты были произведены на ЭЦВМ "Минск-22", а результаты представлены в виде приложения из 75 таблиц, с помощью которых можно легко определить значения коэффициента запаса

прочности горных пород в нижней части склона при известных его геометрических параметрах и прочностных характеристиках массива.

Неравномерное распределение напряжений в массиве горных пород склона наблюдалось также при измерении напряжений в натуре методом разгрузки. Замеры их абсолютных величин были проведены в левобережном склоне долины на горизонте 730 м в 7 скважинах. По результатам измерения напряжений в трех скважинах удалось получить распределение напряжений в плоскости перпендикулярной к р. Нарви. Среднее значение главных наибольших напряжений, замеренных в 14 точках этих скважин (вне зоны влияния штолен) составило 178 кг/см². Это вполне удовлетворительно совпадает с величинами напряжений, полученных методом фотоупругости на моделях для соответствующей области.

Величины и характер распределения напряжений в массиве пород нижней части склона, полученные методом фотоупругости на моделях, хорошо совпадают с результатами натуральных исследований, выполненных Кутеповни В.М. в рассматриваемом склоне. На рис. 4 показаны эпюры вертикальных напряжений в присклоновом массиве, соответствующем горизонту 730 м. Сплошной линией показано изменение

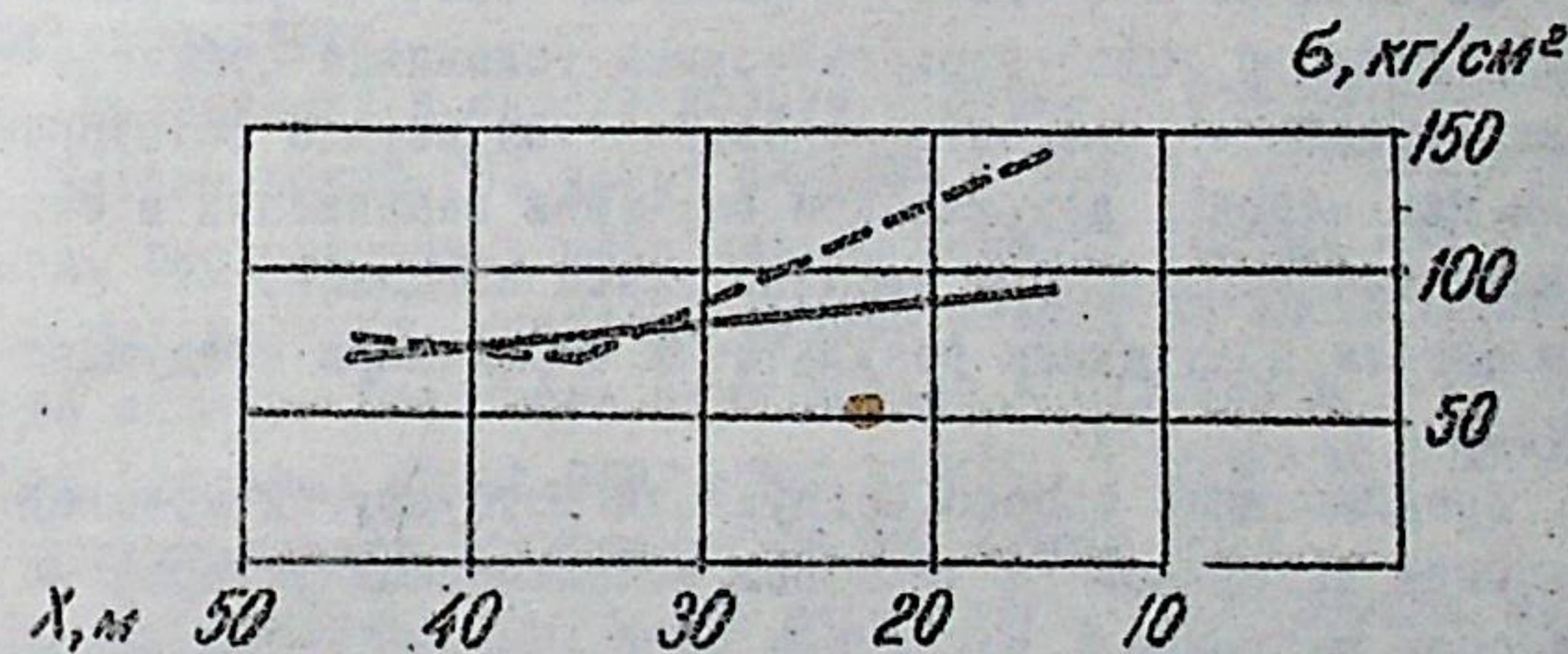


Рис. 4. Эпюры вертикальных напряжений в присклоновой части массива склона.

напряжений в модели, а штриховая линия соответствует изменению напряжений в натуре. Достаточно хорошая сходимость представленных результатов говорит о преемственности использования метода

фотоупругости в числе комплексных методов при исследовании напряженного состояния склонов с учетом неоднородности и трещиноватости пород.

Результаты работы были использованы при проектировании крепления пород и организации службы инженерных наблюдений за устойчивостью склонов р. Нарын в районе строительства Токтогульской ГЭС.

З а к л ь ч е н и е

Исследованиями, выполненными в соответствии с поставленными в работе задачами, были получены следующие результаты:

1. Усовершенствованы приемы метода фотоупругости применительно к исследованию напряжений, а также разрушений в склонах.

2. Установлены закономерности распределения напряжений в горных склонах и в основании долин, имеющих различные геометрические параметры.

3. Установлено влияние отдельных условий неоднородности и трещиноватости массива на напряженное состояние склона.

4. На примере исследования распределения напряжений в склоне с конкретными горно-геологическими условиями показана закономерность и целесообразность использования метода фотоупругости в числе комплексных методов при изучении напряжений в склонах, сложенных неоднородными и трещиноватыми породами.

На основе полученных результатов определены следующие общие выводы:

1. Предложенный способ нагружения фотоупругих моделей гравитационной нагрузкой на линейном механическом ускорителе дает возможность наблюдения изменения напряженного состояния моделей в процессе их нагружения (от начала появления нагрузки до разрушений в модели), что невозможно осуществить на других установках, предназначенных для целей нагружения моделей гравитационной нагрузкой. При подборе соответствующих оптически активных материалов, отвечающих условиям подобия разрушения различных твердых тел, предлагаемый способ может быть использован также и в других областях механики.

2. Распределение напряжений в горных склонах и в основании

долин имеет сложный характер и рассчитывать их величины по весу вышележащих пород недопустимо.

3. Нижняя часть склона и дно долины находятся в сильно напряженном состоянии. Именно это состояние нижней части склона и дна долины в определенных условиях приводит к трещинообразованию и "стрелянию" пород. Для установления степени связанности пород дна с основным подстилающим массивом рекомендуется определить в этих породах с помощью натуральных методов значения горизонтальных напряжений. Высокие значения горизонтальных напряжений указывают на наличие надежной связи между породами дна и основного подстилающего массива.

4. Установлено, что форма основания долины играет существенную роль в формировании концентрации напряжений в нижней части склона. Существует оптимальный радиус закругления основания долины, при котором величина концентрации напряжений приобретает наименьшее значение. Во избежание искусственного увеличения величины концентрации напряжений рекомендуется производить горные работы в нижней части склона с учетом необходимости придания дну долины оптимального радиуса закругления.

5. Предложен инженерный метод расчета напряжений и прочности пород в нижней части склона в зависимости от его геометрических параметров.

6. Напряжения в склоне долины р. Нарын в районе строительства Токтогульской ГЭС имеют сложную картину распределения. Трещины, расположенные параллельно контуру склона или близко к ним по направлению, наиболее сильно влияют на напряженное состояние склона. Опасность этих трещин в отношении устойчивости массива скальных пород, слагающих склоны, обусловлена образованием растягивающих напряжений на их концах.

7. Данные натуральных измерений напряжений, выполненных методом разгрузки, подтверждают сложность картины распределения напряжений в неоднородном и трещиноватом склоне. Величины и характер распределения напряжений в склоне, полученные методом разгрузки в натуре и методом фотоупругости на моделях, совпадают достаточно хорошо, что говорит о правоте и целесообразности использования последнего в числе комплексных методов при исследовании напряженного состояния склонов с учетом неоднородности и трещиноватости пород.

Результаты исследований были использованы при проектировании крепления пород и организации службы инженерных наблюдений за устойчивостью склонов р.Нарын в районе строительства Токтогульской ГЭС.

Диссертационная работа и отдельные её разделы докладывались на II и III конференциях молодых ученых Киргизии (1968-1972 гг.), на научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения В.И.Ленина (1970 г.), на заседании группы рабочего проектирования Кировского водохранилища (1973г.), на технических советах Среднеазиатского отделения института им.С.И.Дука "Гидпроект" и дирекции строящейся Токтогульской ГЭС (1973 г.), на научно-методическом семинаре по механике горных пород и Ученом Совете Института физики и механики горных пород АН Кирг.ССР (1973 г.).

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Влияние трещин на напряженное состояние пород, окружающих горную выработку. В сб. "Устойчивость горных пород в камерах и подготовительных выработках", изд. "Илим", Фрунзе, 1969 г. (соавтор Айтматов И.Т.)

2. Определение толщины дна карьера при комбинированной разработке Хайдарканского месторождения. В сб. "Устойчивость подготовительных выработок и кровли камер", изд. "Илим", Фрунзе, 1971 г. (соавторы Айтматов И.Т., Балаганский С.П., Степанов В.Я., Ялымов Н.Г.).

3. Влияние бокового распора на характер изменения максимальных касательных напряжений в кровле выработки квадратного очертания. В сб. "Устойчивость подготовительных выработок и кровли камер", изд. "Илим", Фрунзе, 1971 г. (соавтор Айтматов И.Т.).

4. Исследование напряжений в горных склонах методом фотоупругости. В сб. "Исследования по физике и механике горных пород", изд. "Илим", Фрунзе, 1972 г. (соавтор Айтматов И.Т.).

5. Напряженно-деформированное состояние горных пород при добыче полезных ископаемых и гидротехническом строительстве (монография, коллектив авторов, под редакцией к.т.н. Айтматова И.Т.) изд. "Илим", Фрунзе, 1973 г.

ПОДПИСАНО В ПЕЧАТЬ 27/ХІ 1973 Г. ФОРМАТ БУМАГИ
ФОРМАТ БУМАГИ 60×90/16. ОБЪЕМ 1,5 л. Л. Д—00616.
ЗАКАЗ 3098. ТИРАЖ 200 ЭКЗ.

Г.ФРУНЗЕ, ТИП АН КИРГИЗ. ССР
УЛ. ПУШКИНА, 144